

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ДУБІК РОМАН МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 519.6:681.5

**МОДЕЛЮВАННЯ І РОБАСТНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСУ
КОНТАКТНОЇ МЕМБРАННОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ**

05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис:

Роботу виконано на кафедрі автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Ладієва Леся Ростиславівна
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Казак Василь Миколайович
Національний авіаційний університет,
професор кафедри автоматизації та енергоменеджменту

кандидат технічних наук, доцент
Луцька Наталія Миколаївна
Національний університет харчових технологій,
доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління

Захист відбудеться «11» грудня 2019 р. о 14³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги 37, корп. 19, ауд. 530.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги 37.

Автореферат розісланий « » листопада 2019 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.04
кандидат технічних наук, доцент

Ковалюк Д.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Дефіцит свіжої води став великою проблемою нашого часу. Зростання населення, поліпшення рівня життя, розвиток сектора сільського господарства і індустріалізація зіграли важливу роль в забезпеченні ще гірших проблем. З іншого боку, традиційні джерела енергії та резервуари прісної води швидко стають дефіцитними. Отже, виникла сильна потреба в розробці менш енергоінтенсивних і екологічно безпечних методів очищення води. Одним з джерел поповнення питних ресурсів може бути опріснення мінералізованих вод. В даний час, на зворотній осмос припадає 60% опріснювальних споруд по всьому світу. Альтернативою зворотному осмосу є контактна мембранна дистиляція (КМД). Для процесу характерні внутрішні збурення, зокрема завдяки концентраційній поляризації. Під час переносу через пори мембрани розчинника, концентрація розчиненої речовини біля її поверхні зростає, що призводить до ряду небажаних наслідків. З часом експлуатації керування процесом КМД ускладнюється через зміну характеристик мембрани, таких як коефіцієнт пористості та термічний опір.

Для забезпечення тривалої роботи системи доцільно побудувати робастну систему керування процесом, яка забезпечить якість керування в разі суттєвих невизначеностей та неконтрольованих внутрішніх збурень і одночасне врахування зміни проникності мембрани для переходу з режиму нормальної експлуатації на режим очистки мембрани.

Процес мембранної дистиляції вивчений ще недостатньо повно, як в експериментальному, так і в теоретичному плані. Одним з найбільш важливих аспектів мембранної дистиляції це мати в розпорядженні мембрани з добре регульованими властивостями. В працях Е. Дріолі, М. Каєта, Ф. Лагана, Р. Курдіяна приділяється увага структурним і фізико-хімічним параметрам мембран, конструкціям мембранних модулів. Багато досліджень спрямовано на опис тепло- і масопереносу в процесі мембранної дистиляції. Вченими М.Е. Фіндлі, Д.Р. Ллойдом, Р.В. Шофілдом, К.В. Лоусоном, М. Гріта, М. Томашевською, М.Т. Бриком, А.Ф. Бурбаном та іншими розглянуті різні математичні підходи до опису температурної і концентраційної поляризації. Успіхів досягли вчені В.В. Угрозов, П.П. Золотарьов, С.Ф. Тімашев, О.А. Жулинський, які розробили математичні моделі процесу мембранної дистиляції, що враховують вплив гідродинаміки течії розчину, розмірів і характеристик мембран, температурних режимів на питомий масовий потік пари через мембрану, температурної поляризації на продуктивність процесу, зміни проникності мембрани. При неповній інформації про параметри процесу КМД і не стаціонарність в умовах невизначеності

актуальним є питання розробки системи керування для забезпечення властивостей робастності динамічної системи. Великий вклад в розвиток теорії робастного керування поклали вчені Г. Замес, М. Сафонов, Дж.С. Дойль, К. Гловер, Б. Френсіс, В.Л. Харитонов, Я.З. Ципкін, В.М. Кунцевич, Б.Т. Поляк, А.П. Ладанюк, А.А. Тунік, С.А. Бродська. Незважаючи на достатньо велику кількість рішень в області адаптивного і робастного керування небагато досліджень присвячене параметрично невизначеним об'єктам, не зважаючи на те, що такі моделі зустрічаються достатньо часто. Особливо при рішеннях у випадку виникнення відмов у процесі функціонування.

Недостатній рівень розробки питань створення математичних моделей, алгоритмів керування процесу КМД з урахуванням невизначеностей, системи автоматичного керування, обумовив те, що їх розробка є актуальною науково-технічною задачею, розв'язку якої і присвячена робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в межах тематики, яка відповідає напрямку наукових досліджень кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. Робота безпосередньо пов'язана з ініціативними НДР: «Створення комп'ютерно-інтегрованих систем керування технологічних процесів та виробництв переробних галузей України для забезпечення ресурсо- та енергозберігаючих режимів їх функціонування», № ДР 0116U001765; «Створення комп'ютерно-інтегрованих систем автоматичного контролю та керування, що забезпечують ресурсо- та енергозберігаючі режими функціонування технологічних процесів та виробництв», № ДР 0110U006890.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення рівня ефективності процесу КМД шляхом вдосконалення керування установкою при невизначеності функціональних властивостей мембрани.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних задач:

- розробка математичної моделі процесу КМД з урахуванням змін просторових швидкостей і температур за каналами мембранного модуля і в порах мембрани;
- розробка математичної моделі динаміки процесу КМД для цілей робастного керування, яка враховує невизначеності процесу;
- експериментальні дослідження процесу КМД для перевірки адекватності моделей;

- синтез робастного регулятора для підтримання необхідного перепаду температур між розчином і дистилятом на виході мембранного модуля і забезпечення в заданих межах стійкості системи;
- розробка системи робастного керування процесу КМД;
- розробка системи керування процесу КМД для переходу об'єкту з режиму експлуатації на режим очистки мембрани;
- створення програмно-алгоритмічних засобів системи робастного керування процесу КМД.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес знесолення природних вод методом контактної мембранної дистиляції.

Предмет дослідження. Система керування процесу контактної мембранної дистиляції на основі алгоритму робастного керування.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у роботі використовувались методи математичного моделювання, методи математичного моделювання в умовах невизначеностей, числові методи розв'язання диференціальних рівнянь, методи ідентифікації параметрів, методи теорії оптимального і робастного керування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- запропонована математична модель тепломасообміну процесу КМД, яка враховує просторові розподіли температури і швидкості в каналах мембранного модуля і в порах мембрани;
- розроблена математична модель процесу концентрування розчину на установці КМД, призначена для робастного керування процесом, яка відрізняється урахуванням невизначеності параметрів процесу КМД;
- синтезовано робастний регулятор для процесу контактної мембранної дистиляції, що підтримує необхідний перепад температур між розчином і дистилятом;
- розроблена система автоматичного керування процесом на основі робастного регулятора, що забезпечує керування процесом в умовах невизначеності і дозволяє при необхідності зупиняти установку на очищення чи заміну мембрани.

Практичне значення одержаних результатів полягає в підвищенні ефективності керування установкою контактної мембранної дистиляції, підвищенні рівня енергозбереження процесу при невизначеності функціональних властивостей мембрани. Створена математична модель тепломасообміну процесу КМД, яка враховує просторові розподіли температури і швидкості в каналах мембранного модуля, а також математична модель процесу концентрування розчину на установці

КМД, яка відрізняється урахуванням невизначеності параметрів процесу. Розроблений алгоритм робастного керування зі зворотним зв'язком для системи автоматичного керування установкою КМД, що забезпечує керування процесом в умовах невизначеності і дозволяє при необхідності зупиняти на очистку чи заміну мембрани. Розроблений програмний модуль «Моделювання та оптимальне керування процесом контактної мембранної дистиляції» впроваджений на ПрАТ «РОСИЧ» у складі системи автоматичного керування концентрування освітлених яблучних соків. У навчальний процес кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» впроваджені математичні моделі процесу контактної мембранної дистиляції, системи оптимального і робастного керування процесу контактної мембранної дистиляції.

Особистий внесок здобувача. Автором обґрунтовано наукові положення, теоретичні і практичні задачі дослідження, отримані результати. У публікаціях в співавторстві особистий внесок автора полягає в наступному: розробці нелінійної математичної моделі процесу КМД, отримання перехідних процесів за відповідними каналами; проведенні порівняльного аналізу регуляторів, таких як, оптимальний лінійний, за бажаним розміщенням полюсів, за допомогою методу досягнення цілі; проведенню динамічного та статичного моделювання процесу КМД, перевірена відповідність математичної моделі експериментальним даним; розробці математичної моделі процесу КМД з розподіленими параметрами, отримання розподілу швидкостей і температур в каналах ММ і самій мембрані; аналізу впливу невизначеностей на процес КМД в часовій і частотній областях; розробці системи керування процесу КМД в умовах параметричної невизначеності з H_∞ регулятором, аналіз отриманої системи керування в часовій і частотній області; розробці системи керування процесу КМД в умовах параметричної невизначеності з μ регулятором, аналіз отриманої системи керування в часовій і частотній області та порівняння отриманих результатів з H_∞ регулятором; розробка підходів до нелінійного моделювання і керування процесу КМД; запропоновано вирішення задачі робастного керування процесу КМД за допомогою H_∞ регулятора, розглянуто синтез системи та практичний підхід до вибору вагових функцій; розроблено спрощену математичну модель процесу КМД яка враховує зміну температур розчину і дистиляту вздовж каналів мембрани і по висоті мембранного модуля, а також описує зміну температури потоку пари в порах мембрани; розглянуто математичну модель КМД з урахуванням впливу потоків розчину і дистиляту, розмірів і характеристик температурних умов мембрани за питомого масового потоку пари

крізь мембрану, термічної поляризації на продуктивність процесу, нелінійної дифузії парів через мембрану.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на: XVI міжнародній конференції по автоматичному управлінню «Автоматика - 2009», м. Чернівці, вересень 2009 року; XVI міжнародній конференції «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-22», м. Псков, червень 2009 року; міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними комплексами», м. Київ, вересень 2009 року; XVII міжнародній конференції по автоматичному управлінню «Автоматика - 2010», м. Харків, вересень 2010 року; XXI Українському науковому семінарі «Мембранні і сорбційні процеси та технології», м. Київ березень 2011 року; XVIII міжнародній конференції по автоматичному управлінню «Автоматика - 2011», м. Львів, вересень 2011 року; XXV міжнародній науково-практичній конференції «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-25», м. Саратов квітень 2012 року; XIX міжнародній конференції по автоматичному управлінню «Автоматика - 2012», м. Київ, вересень 2012 року; IX науково-практичній конференції VEDA A TECHNOLOGIE: KROK DO BUDOUCNOSTI, м. Прага березень 2013 року; IX науково-практичній конференції «NAUKOWA MYSL INFORMACYJNEJ POWIEKI - 2013» м. Пшемишль квітень 2013 року; XXVI міжнародній конференції «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-26», м. Нижній Новгород травень 2013 року; XX міжнародній конференції по автоматичному управлінню «Автоматика-2013», м. Миколаїв, вересень 2013 року; XXI міжнародній конференції по автоматичному управлінню «Автоматика - 2014», м. Київ, вересень 2014 року.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 26 наукових праць, у тому числі, 11 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданнях іноземних держав, 3 у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз), 3 патенти на корисну модель, 12 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг дисертації 181 аркушів, містить 48 рисунків, 6 таблиць, 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

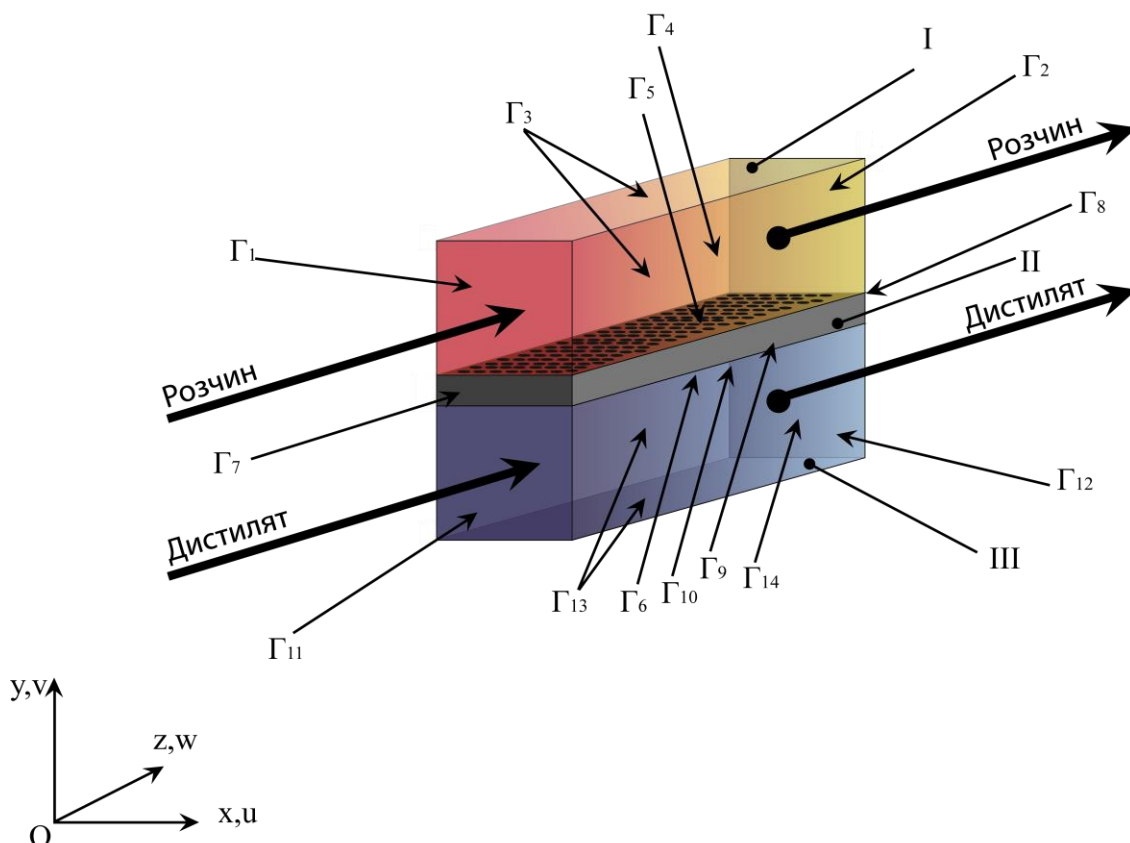
Вступ. Обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформована мета і задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, інформація про публікації, апробацію і впровадження одержаних результатів дослідження.

У першому розділі з метою створення математичної моделі процесу контактної мембранної дистиляції при розробці алгоритмів і системи керування процесом проведено аналіз процесів мембранної дистиляції і їх особливостей для отримання чистої води, концентрування соків.

Розглянуті математичні моделі процесу контактної мембранної дистиляції. Розроблені математичні моделі процесу КМД, які враховують вплив температурних режимів на питомий масовий потік пари через мембрану, температурної поляризації на продуктивність процесу, зміни проникності мембрани. Механізм переносу тепла через мембрану з парою і через структуру мембрани описувався в граничних умовах для потоків розчину і дистиляту і без врахування зміни швидкості і температури пари в порах мембрани. Разом з тим в існуючих моделях недостатньо уваги приділено урахуванню розподілу швидкостей і температур у порах мембрани і створенню математичної моделі, яка б враховувала більш повно зміну температур у мембранному модулі. Завдяки концентраційній поляризації, кристалізації солей забруднюється поверхня мембрани у вигляді осаду, гелю. З часом роботи гідрофобної мембрани на її поверхні утворюються гідрофільні ділянки, через які рідина потрапляє на інший бік мембрани. Ці фактори зменшують продуктивність процесу.

За результатами огляду літературних джерел сформульовано напрямки досліджень з метою створення ефективної системи керування процесом, розроблені математичні моделі, алгоритми керування установкою в режимі експлуатації і зупинки на очистку мембрани.

Другий розділ присвячений створенню математичних моделей процесу КМД. На основі проведеного аналізу гідродинаміки течії розчину, тепломасопереносу в каналах мембранного модуля математична модель процесу КМД доповнена просторовими розподілами швидкостей і температур в порах мембрани. Структурно мембранний модуль можна зобразити як показано на рис. 1.



I – канал водного розчину солі; II – мембрана; III – канал охолоджуючої води
Рис. 1 Схема мембранного модуля

Система рівнянь гідродинаміки і тепло масообміну для потоків рідини в каналах, що включає рівняння нерозривності, руху, концентрації (для розчину солі) і тепло масообміну:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0; \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \tau} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{V} + [\beta_T (T - T_0) + \beta_c (c - c_0)] \mathbf{g}_y; \\ \frac{\partial c}{\partial \tau} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) c = D_s \Delta c; \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \chi \Delta T + D_s (\nabla c \cdot \nabla T), \end{cases} \quad (1)$$

де $\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\}$ – оператор Гамільтона; $\Delta = \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\}$ – оператор Лапласа;

ρ – густина, кг/м³; τ – час, с; $\mathbf{V} = (u, v, w)$ – вектор швидкості, м/с; (u, v, w – проекції швидкості на вісі Ox, Oy, Oz відповідно); P – тиск, Па; μ – коефіцієнт динамічної

в'язкості, Па·с; $\beta_T = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$ – коефіцієнт об'ємного температурного розширення, K⁻¹;

$\beta_c = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial c}$ – коефіцієнт об'ємного концентраційного розширення; T_0 – температура навколишнього середовища, K; c – концентрація солі, кг/кг; c_0 – рівноважна концентрація; g_y – прискорення вільного падіння, м/с²; D_s – коефіцієнт дифузії, м²/с; χ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с.

Система рівнянь гідродинаміки і тепло масообміну для потоку пари в мембрані, що включає рівняння нерозривності, руху з урахуванням закону Дарсі і тепло масообміну.

$$\begin{cases} \gamma \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + K \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0; \\ \gamma \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \tau} + K(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \gamma \frac{J_w \mathbf{V}}{\delta \rho} + \frac{\mu_e}{\rho} K \Delta \mathbf{V} + \beta_T (T - T_0) \gamma g_y; \\ \gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} + K(\mathbf{V} \cdot \nabla) T = \chi_e K \Delta T, \end{cases} \quad (2)$$

де γ – коефіцієнт об'ємної пористості мембрани; K – коефіцієнт поверхневої пористості мембрани; J_w – проникність мембрани по пару, кг/(м²·с); $1/J_w$ – коефіцієнт опору потоку пари у пористому середовищі (мембрані), (м²·с)/кг; μ_e – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості пари, Па·с; χ_e – ефективний коефіцієнт температуропровідності пари, м²/с.

Границі для завдання граничних умов.

Канал І: Γ_1 – вхід; Γ_2 – вихід; Γ_3 – верх і бік каналу; Γ_4 – площа симетрії.

Мембрана ІІ: Γ_5 – контакт мембрани з розчином; Γ_6 – контакт мембрани з охолоджуючою водою; Γ_7, Γ_8 – торці мембрани; Γ_9 – бік мембрани; Γ_{10} – площа симетрії.

Канал ІІІ: Γ_{11} – вхід; Γ_{12} – вихід; Γ_{13} – низ і бік каналу; Γ_{14} – площа симетрії.

Розглянемо основні граничні умови: спільна межа каналу з розчином і мембраною

$$\Gamma_5: \begin{cases} T_I = T_{II}; \\ \mathbf{n}(-\lambda_I \nabla T) - J_w r_w = \mathbf{n}(-\lambda_{eII} \nabla T); \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{V}_I = \mathbf{n} \cdot \mathbf{V}_{II}; \\ \mathbf{n}(-D_{sI} \nabla c) = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{V}_{II}) c_w; \end{cases} \quad (3)$$

спільна межа мембрани і каналу з дистиллятом

$$\Gamma_6: \begin{cases} T_{II} = T_{III}; \\ \mathbf{n}(-\lambda_{eII} \nabla T) + J_w r_w = \mathbf{n}(-\lambda_{III} \nabla T)_w; \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{V}_{II} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{V}_{III}, \end{cases} \quad (4)$$

де T – температура, К; \mathbf{n} – зовнішня нормаль до межі Γ ; λ_{eII} – ефективна теплопровідність потоку пари в мембрані, Вт/(м·К); r_w – теплота пароутворення, Дж/кг.

За каналом з водним розчином солі ($NaCl$) розглядалися всі рівняння системи (1). При цьому всі властивості мають індекс I.

За каналом з охолоджуючою водою (дистилятом) розглядаються три рівняння системи (1), крім рівняння концентрації. Всі властивості дистиляту мають індекс III.

Для мембрани розглядається система рівнянь (2), всі властивості мембрани мають індекс II.

Результати моделювання показали, що по довжині каналу мембранного модуля (ММ) збільшується температурна поляризація, яка призводить до зменшення термічного опору на поверхні мембрани і перепад температур на мембрані стає меншим. За рахунок збільшення швидкості подачі розчину і турбулізації примембранного шару можна зменшити температурну поляризацію.

Аналогічно знаходився розподіл швидкостей і температури пари вздовж пори мембрани, потім розрахунок проводився для каналу дистиляту.

Математична модель процесу КМД (1) – (2) може використовуватися для постановки і розв'язку задач, що пов'язані з покращенням техніко-економічних показників установки КМД, а також на етапі проектування нових установок.

Для цілей керування розроблена спрощена математична модель процесу КМД з зосередженими параметрами, що враховує переніс тепла крізь полімерну структуру мембрани та з потоком пари розчинника.

В зв'язку з тим, що зміна температури розчину по довжині каналу мембранного модуля складає декілька градусів, для цілей керування ММ розглядається як об'єкт з зосередженими параметрами, який складається з теплоакуючих ємностей:

канал розчину;

канал дистиляту.

При створенні математичної моделі прийняті наступні припущення:

1) мембрана ідеальна, тобто гідрофобна з однаковим радіусом пор та непошкодженим селективним прошарком;

2) не враховано вплив температурної та концентраційної поляризації;

3) неврахована зміна температури та концентрації вздовж каналів ММ;

4) ємність мембрани не розглядалася, враховуючи її товщину у порівнянні з висотою каналів розчину та дистилляту.

Математичний опис ММ складається на основі матеріальних і енергетичних потоків процесу.

Рівняння теплового балансу динаміки ММ має наступний вигляд

$$\begin{aligned} G_{PH}c_{PH}\theta_{PH} - kF(\theta_{PK} - \theta_{DK}) - F\varepsilon J_p r - G_{PK}c_{PK}\theta_{PK} &= V_P\rho_{PK}c_{PK}\frac{d\theta_{PK}}{dt}, \\ G_{DH}c_{DH}\theta_{DH} + kF(\theta_{PK} - \theta_{DK}) + F\varepsilon J_p r - G_{DK}c_{DK}\theta_{DK} &= V_D\rho_{DK}c_{DK}\frac{d\theta_{DK}}{dt}, \end{aligned} \quad (5)$$

де θ_{PK} , θ_{DK} – температура розчину і дистилляту на виході з ММ, К; θ_{PH} , θ_{DH} – температура розчину і дистилляту на вході в ММ, К; G_{PH} , G_{DH} – витрати розчину і дистилляту на вході в ММ, кг/с; G_{PK} , G_{DK} – витрати розчину і дистилляту на виході з ММ, кг/с; c_{PH} , c_{DH} – теплоємність розчину і дистилляту на вході в ММ, Дж/(кг·К); c_{PK} , c_{DK} – теплоємність розчину і дистилляту на виході з ММ, Дж/(кг·К); ρ_{PK} , ρ_{DK} – густина розчину і дистилляту на виході з ММ, кг/м³; r – питома теплота пароутворення, Дж/кг; F – площа мембрани, м²; J_p – питомий масовий потік пари, кг/(м²·с); ε – коефіцієнт пористості мембрани; k – усереднений коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); $V_P = V_D = Sl$ – об'єм каналу розчину і дистилляту, м³; l – довжина каналу, м; S – площа поперечного перерізу каналу розчину, м².

Рівняння матеріального балансу динаміки по концентрації солі у розчині має вигляд

$$G_{PH}b_{PH} - G_{PK}b_{PK} = V_P\rho_{PK}\frac{db_{PK}}{dt}, \quad (6)$$

де b_{PH} , b_{PK} – відповідно початкова і кінцева концентрації солі, кг/кг.

Записана математична модель процесу КМД є нелінійною по відношенню до температури розчину на виході з ММ, яка також входить в складову рівнянь, що враховує потік пари через мембрану. При збільшенні температури розчину на вході ММ температури розчину і дистилляту на виході з ММ збільшуються нелінійно. Отримані перехідні процеси за каналами «температура розчину на вході в ММ – температура розчину на виході з ММ», «температура розчину на вході в ММ – температура дистилляту на виході з ММ», «температура розчину на вході в ММ – концентрація розчину на виході з ММ».

Для синтезу системи керування процесу КМД розглядається промислова установка КМД як система «нагрівач – ММ». Математична модель ММ доповнена математичною моделлю нагрівача з паровою рубашкою.

Температурна поляризація негативно впливає на продуктивність процесу КМД за рахунок зменшення температури розчину на поверхні випаровування і її

збільшення на поверхні конденсації. Основний вплив на рівень температурної поляризації мають умови теплопередачі через мембрану. В результаті забруднення поверхні мембрани в процесі роботи змінюється термічний опір.

Поверхня мембрани гідрофобна і при тривалому контакті з водним розчином, змінюється гідрофільно-гідрофобний баланс поверхневого шару і зокрема пористість мембрани.

У ММ невизначеними параметрами є сумарний термічний опір і пористість мембрани, які суттєво впливають на якість ведення процесу. Всі коефіцієнти моделі, що мають дані параметри невизначеності представляються у вигляді

$$a = \bar{a}(1 + p\delta), \quad (7)$$

де \bar{a} – номінальне значення невизначеного параметра a ; p – відносна невизначеність; нормоване значення коефіцієнта невизначеності

$$0 \leq \delta \leq 1. \quad (8)$$

У нерівності (8) значення параметра $\delta = 0$ відповідає новій мембрані, а $\delta = 1$ на межі можливості подальшої експлуатації мембрани.

Коефіцієнт, який враховує невизначеність може бути представлений у вигляді верхнього дробово-лінійного перетворення (ДЛП)

$$a = F_U(\mathbf{M}, \delta), \quad (9)$$

де $F_U(.)$ – оператор верхнього ДЛП; $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & \bar{a} \\ p & \bar{a} \end{bmatrix}$.

Коефіцієнти, що враховують невизначеності винесені з моделі в окремий блок невизначеностей Δ , який складається з нормованих параметрів невизначеностей з нульовим номінальним значенням та діапазоном зміни від 0 до 1.

$$\Delta = \text{diag}(\delta_{15}, \delta_{16}, \delta_{25}, \delta_{26}). \quad (10)$$

Рушійною силою процесу є перепад температур між розчином і дистиллятом на вході в ММ. Для визначення зміни стану мембрани і зміни потоку пермеату використано зміну перепаду температур на виході з установки. Вздовж каналів ММ перепад температур розчину і дистилляту зменшується. При погіршенні стану мембрани і зміні її проникності збільшується перепад температур на виході з ММ. Тому непрямым показником якості ведення процесу вибрано перепад температур, що враховано у математичній моделі процесу. В якості керуючого впливу вибрано витрати гріючої пари на підігрів розчину. Підтримання заданого перепаду температур на виході ММ забезпечується зміною вхідної температури розчину. Математична модель за формою верхнього ДЛП перетворення має вигляд

$$\Delta\theta = F_U(\mathbf{G}, \Delta)G_{\Pi}, \quad (11)$$

де $\Delta\theta$ – перепад температур на виході ММ; G_{Π} – витрати грійочої пари; математична модель у вигляді матриць

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_1 & \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де матриця стану

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{51} & a_{52} & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & 0 & 0 \\ 0 & a_{12} & \bar{a}_{15} & \bar{a}_{16} \\ 0 & 0 & \bar{a}_{25} & \bar{a}_{26} \end{bmatrix};$$

матриці входів невизначеності процесу КМД та подачі грійочої пари відповідно

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{15} & p_{16} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{25} & p_{26} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

матриці виходів невизначеностей та перепаду температур на виході установки КМД відповідно

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \bar{a}_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{a}_{16} \\ 0 & 0 & \bar{a}_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{a}_{26} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_2 = [0 \quad 0 \quad 1 \quad -1];$$

$\mathbf{D}_{12} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$, $\mathbf{D}_{21} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$ – прямі зв'язки, що пов'язують входи та виходи невизначеності;

Математична модель процесу КМД представлена у просторі станів

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{w} + \mathbf{B}_2G_{\Pi}, \\ \mathbf{z} = \mathbf{C}_1\mathbf{x} + \mathbf{D}_{12}G_{\Pi}, \\ \Delta\theta = \mathbf{C}_2\mathbf{x} + \mathbf{D}_{21}\mathbf{w}, \end{cases} \quad (13)$$

де вектор стану

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta_{\Pi} & \theta_{PH} & \vdots & \theta_{PK} & \theta_{DK} \end{bmatrix}^T;$$

виходи та входи невизначеностей відповідно

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} y_{15} & y_{16} & y_{25} & y_{26} \end{bmatrix}^T; \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} u_{15} & u_{16} & u_{25} & u_{26} \end{bmatrix}^T,$$

які пов'язані співвідношенням $\mathbf{w} = \Delta \mathbf{z}$.

Проведено аналіз впливу невизначеностей на роботу установки КМД. Дослідження логарифмічних амплітудо-частотних і логарифмічних фазочастотних характеристик об'єкту при різних значеннях структурованих параметричних збурень показали, що чутливість системи до невизначеностей математичної моделі процесу КМД проявляється в високочастотній області.

В третьому розділі розглянуто синтез робастного керування, що забезпечує роботу установки КМД в умовах зміни стану мембрани в процесі експлуатації і відповідно параметрів математичної моделі.

З метою практичної реалізації системи розв'язувалась задача оптимального керування з квадратичним показником якості зі зворотнім зв'язком.

Оскільки, математична модель процесу КМД чутлива до невизначеностей параметрів моделі процесу, проведена перевірка оптимальної системи керування для заданих невизначеностей. Числові дослідження оптимальної системи керування показали, що оптимальна система керування не забезпечує заданої якості і виходить на межу стійкості при зміні термічного опору на поверхні мембрани і пористості мембрани. Тому вибрано синтез робастного керування установкою КМД. Для розв'язання задачі робастного керування застосували H_{∞} оптимізацію. На основі аналізу стану мембрани в процесі роботи вважалося, що сумарний термічний опір збільшується на 20 %, а пористість мембрани зменшується на 20 %. З урахуванням вимог, що висуваються до системи керування можна записати наступні критерії якості у вигляді:

- для слідкування похибки

$$\|W_S(s)S(s)\|_{\infty} < 1; \quad (14)$$

- для перепаду температур розчину і дистилату на виході ММ

$$\|W_T(s)T(s)\|_{\infty} < 1, \quad (15)$$

де $S(s)$, $T(s)$ – функція чутливості та функція додаткової чутливості; $W_S(s)$, $W_T(s)$ – вагові передатні функції.

Для зменшення витрат гріючої пари використовується передатна функція по керуючому впливу $R(s)$ з відповідним ваговим коефіцієнтом $W_R(s)$ для обмеження амплітуд вихідного сигналу

$$\|W_R(s)R(s)\|_{\infty} < 1. \quad (16)$$

Синтез H_∞ регулятора полягав у пошуку стабілізуючого регулятора $K(s)$, який би зводив до мінімуму енергію виходу системи на всьому діапазоні робочих частот. За допомогою вагових функцій домоглися від системи необхідних фазових та амплітудних складових як на вхідних, так і на вихідних сигналах.

Процедура H_∞ синтезу полягала в послідовному розв'язку двох рівнянь Ріккати для регулятора і спостерігача та отримано найменше значення $\gamma = 0,64$ на 11 ітерації.

Результати моделювання показали, що H_∞ регулятор забезпечує робастну стійкість – 0,98, але не задовольняє робастній якості – 1,08 (динамічним властивостям).

При наданні системі властивостей слабкої чутливості для збурювальних впливів і забезпечення стабільності динамічних характеристик процесу КМД застосували μ -синтез.

Слід відзначити, що в математичну модель процесу КМД, що використовується в μ -синтезі, входять вагові передатні функції і матриці масштабувальних передатних функцій, що призводить до збільшення розмірності моделі системи та розмірності регулятора $K(s)$. У зв'язку з цим виникає задача зниження розмірності регулятора. Дана задача вирішується за методом оптимальної апроксимації за допомогою ганкелевої норми. Розмірність отриманого регулятора 9 порядок, а редукованого 4-й.

За 4 ітерації було синтезовано μ регулятор порядку 9 з кінцевим значенням $\gamma = 0,62$, робастними: стійкістю – 0,91 і якістю – 0,9. Завершальним етапом є зниження порядку регулятора. Точність за ганкелевою нормою становить 10^{-9} при цьому помилка між номінальним і редукованим регулятором близько нуля. Отримані результати моделювання в середовищі MATLAB, розроблені відповідні m-файли.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням і практичному застосуванню моделей і алгоритмів оптимального робастного керування процесу КМД. Математична модель процесу КМД, розроблені алгоритми оптимального робастного керування реалізовані у вигляді програмного модуля «Моделювання і оптимальне керування процесом контактної мембранної дистиляції». Для перевірки дієздатності програмного модуля проведені дослідження в умовах, наближених до реальних на лабораторній установці в лабораторії мембранних процесів Національного університету «Києво-Могилянська академія».

Безпосередньо дослідити перехідний процес в ММ за каналами “температура розчину на вході в ММ – температура розчину на виході з ММ” не можливо, тому що перед подачею до ММ розчин підігрівається у змішувальному нагрівачі. Тому для отримання перехідних процесів ММ за каналом “температура розчину на вході в

ММ – температура розчину на виході з ММ” знімали перехідні характеристики по каналам: “потужність нагрівача в термостаті – температура розчину на вході в ММ”, “потужність нагрівача – температура розчину на виході з ММ”. Експериментально отримані перехідні процеси згладжувались ланцюжком аперіодичних ланок першого порядку, за допомогою нелінійного методу найменших квадратів. Виділена експериментальна перехідна характеристика. Проведена перевірка адекватності математичних моделей процесу КМД. Сума квадратів нев'язок перехідної характеристики спрощеної математичної моделі процесу КМД відносно експериментальних даних становить близько 0,016, а моделі з розподіленими параметрами близько 0,011.

Розроблені варіанти систем автоматичного керування процесом КМД, основна відмінність яких полягає в способі вимірювання перепаду температур, що впливає на пропускну здатність мембрани. Розроблена система керування процесом на основі робастного регулятора, що забезпечує керування процесом в умовах невизначеності і дозволяє при необхідності зупиняти установку на очистку чи заміну мембрани.

Робастне керування процесом ведеться за пропускну здатністю мембрани. Ведення процесу відбувається доти, доки виконуються критерії робастної стійкості та якості системи і продуктивність мембрани залишається на належному рівні.

Математична модель процесу і алгоритми оптимального керування реалізовані у вигляді промислового модуля на мові програмування C++ (Microsoft VS 2008) можуть бути використані для дослідження та керування процесом. Алгоритм керування, що розроблено у складі системи автоматичного керування процесом концентрування соків, реалізовано на основі контролерів. Економічний ефект від впровадження модуля досягнуто за рахунок зменшення енерговитрат на 12 – 14 %.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі підвищення ефективності керування установкою контактної мембранної дистиляції шляхом вдосконалення керування процесом при невизначеності функціональних властивостей мембрани.

1. На основі проведеного аналізу встановлено, що задача моделювання і керування процесу контактної мембранної дистиляції в умовах невизначеності параметрів є актуальною.

2. Розроблена математична модель процесу контактної мембранної дистиляції, яка враховує просторовий розподіл швидкостей і температур по каналах мембранного модуля і в порах мембрани.
3. Створена спрощена математична модель динаміки для керування процесу контактної мембранної дистиляції, яка описує тепло- і масообмін через полімерну мембрану в умовах невизначеності параметрів.
4. Проведені експериментальні дослідження динамічних режимів роботи мембранного модуля плоскокамерного типу з мембраною МФФК-4. Сума квадратів нев'язок перехідної характеристики спрощеної математичної моделі процесу контактної мембранної дистиляції відносно експериментальних даних за каналом «температура розчину на вході в мембранний модуль – температура розчину на виході з мембранного модуля» дистиляції становить близько 0,016, а моделі з розподіленими параметрами близько 0,011.
5. Синтезовано H_∞ і μ регулятори для підтримання необхідного перепаду температур між розчином і дистилятом на виході мембранного модуля і забезпечення в заданих межах стійкості системи при зменшенні витрат гріючої пари, які показали доцільність застосування μ регулятора.
6. Розроблена система керування процесом на основі робастного регулятора, що забезпечує керування процесом в умовах невизначеності і дозволяє при необхідності зупиняти установку на очистку чи заміну мембрани.
7. Розроблено автоматизовану інформаційну технологію керування процесу контактної мембранної дистиляції, основними компонентами якої є наступні технічні, програмні та організаційно-методичні засоби: математичні моделі установки, дослідження процесу, оптимальне робастне керування та система автоматичного керування.
8. Впроваджені у ВАТ «РОСИЧ» результати моделювання та оптимальне керування дали можливість розраховувати оптимальні режими концентрування різних розчинів, особливо у разі нестабільних витрат з урахуванням хімічного складу рідких систем з одночасним зниженням на 12,...,14% енерговитрат на концентруванні.
9. Впроваджені у навчальний процес на кафедрі автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» такі результати дослідження: математичні моделі процесу контактної мембранної дистиляції, система оптимального і робастного керування процесу контактної мембранної дистиляції.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях:

1. **Дубік Р.М.** Математична модель розділення неоднорідних рідких систем / **Р.М. Дубік, Л.Р. Ладієва** // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. –2009. – №1(23). – с. 49 – 54. *Особистий внесок здобувача: створення моделі динаміки процесу контактної мембранної дистиляції на основі рівнянь теплових і матеріальних балансів.*
2. Ладієва Л.Р. Оптимальне керування процесом контактної мембранної дистиляції / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік** // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. –2009. – №2(24). – с. 152 – 156. *Особистий внесок здобувача: дослідження задач керування процесу контактної мембранної дистиляції, а саме застосування лінійного оптимального регулятора, розміщення полюсів за допомогою зворотного зв'язку за станом, методу досягнення цілі Гембіки.*
3. Ладієва Л.Р. Математичне моделювання процесу контактної мембранної дистиляції / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік** // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження №2(6) – 2010 с. 119 – 122. *Особистий внесок здобувача: проведена лінеаризація математичної моделі динаміки процесу контактної мембранної дистиляції, досліджено вплив нелінійності, проведена перевірка адекватності математичних моделей експериментальним даним.*
4. Ладієва Л.Р. Математична модель теплообміну в процесі контактної мембранної дистиляції / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік** // Науковий журнал «енергетика, економіка, технології, екологія». – 2011. – №1(28). – с. 10 – 16 (OAJI, WorldCat, BASE, PBN, IOR, Academic Keys, GIF, DRJI, SIS, Cosmos impact factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor). *Особистий внесок здобувача: вперше запропонована математична модель процесу контактної мембранної дистиляції, яка базується на рівняннях нерозривності Нав'є-Стокса, енергії і маси; проведено імітаційне моделювання в результаті якого отримано просторовий розподіл швидкостей і температур в каналах мембранного модуля і порах мембрани.*
5. **Дубік Р.М.** Моделювання процесу контактної мембранної дистиляції за умов невизначеності / **Р.М. Дубік, Л.Р. Ладієва** // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – №1(7). – с. 110 – 113. *Особистий внесок здобувача: вперше запропонований математичний опис невизначеностей, які виникають з часом експлуатації мембрани.*
6. Ладієва Л.Р. Робастна система керування процесом контактної мембранної дистиляції / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік** // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. № 2 (8). – с. 128 – 133. *Особистий внесок здобувача: розглянута система керування процесу контактної мембранної дистиляції з H_∞ регулятором.*

7. Ладієва Л.Р. Проектування системи керування процесом контактної мембранної дистиляції за допомогою технології μ – синтезу / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік** // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження – 2012. № 1 (9) – с. 106 – 110. *Особистий внесок здобувача: розглянута система керування процесу контактної мембранної дистиляції з використанням μ синтезу, як покращення системи керування з H_∞ регулятором.*

8. Lesya Ladieva. Mathematical simulation and process control of contact membrane distillation under uncertainty / Lesya Ladieva, **Roman Dubik** // The advanced science journal. 312 – chemical engineering. 2013 pp. 11 – 14 (Index Copernicus, CrossRef, EBSCO, WorldCat OLCL, CNKI, Google Scholar, CiteSeerX, Mendeley® by Elsevier, BASE, Ulrich's Global, Ulrichsweb). *Особистий внесок здобувача: розглянута можливість керування процесу контактної мембранної дистиляції за нелінійною моделлю.*

9. Ладієва Л.Р. Керування процесом контактної мембранної дистиляції за допомогою H_∞ - регулятора. Проектування системи / Л.Р. Ладієва, А.Ф. Бурбан, **Р.М. Дубік** // Хімічна промисловість України – 2014. № 1(120) – с. 7 – 10. *Особистий внесок здобувача: спроектована система на базі H_∞ - регулятора, виконано підбір вагових функцій.*

10. Ладієва Л.Р. Математичне моделювання розподілу температур у мембранному модулі в процесі мембранної дистиляції / Л.Р. Ладієва, В.О. Оніщенко, **Р.М. Дубік** // Науковий журнал «Наукоємні технології» – 2015 № 1 (25) – с. 5 – 8 (SSM, Research Bible, Sjournals Index, VNLU, UIF, DRJI, SciELO, Index Copernicus, Google Scholar, BASE, Beardslee Library Journals, ISSN, Ulrichsweb). *Особистий внесок здобувача: досліджено спрощену математичну модель процесу контактної мембранної дистиляції, яка враховує зміну температур розчину і дистиляту вздовж каналів мембрани і по висоті мембранного модуля, а також описує зміну температури потоку пари в порах мембрани.*

11. Ladieva L. Mathematical model of membrane distillation process / L. Ladieva, S. Dovbnya, **R. Dubik** // Наукоємні технології – 2017, № 2 (34) – с. 178 – 183 (SSM, Research Bible, Sjournals Index, VNLU, UIF, DRJI, SciELO, Index Copernicus, Google Scholar, BASE, Beardslee Library Journals, ISSN, Ulrichsweb). *Особистий внесок здобувача: розглянуто математичну модель процесу контактної мембранної дистиляції з урахуванням впливу гідродинамічного потоку розчину і дистиляту, розмірів і характеристик температурних умов мембрани за питомого масового потоку пари крізь мембрану, термічній поляризації на продуктивність процесу, нелінійної дифузії парів через мембрану.*

Патенти на корисні моделі:

12. Патент на корисну модель 69081. Спосіб автоматичного керування процесом контактної мембранної дистиляції / **Р.М. Дубік**, Л.Р. Ладієва; заявл. 03.08.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8, 2012 р. *Особистий внесок здобувача: запропоновано спосіб автоматичного керування процесом контактної мембранної дистиляції*

шляхом регулювання подачі теплоносія у нагрівач в залежності від поточного значення перепаду температур на виході з мембранного модуля з корекцією по перепаду температур на вході в мембранний модуль.

13. Патент на корисну модель 68019. Спосіб автоматичного керування процесом контактної мембранної дистиляції / **Р.М. Дубік**, Л.Р. Ладієва; заявл. 28.08.2011; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5, 2012 р. *Особистий внесок здобувача: запропоновано спосіб автоматичного керування процесом контактної мембранної дистиляції шляхом регулювання подачі теплоносія у нагрівач, в залежності від поточного значення перепаду температур розчину та дистиляту на виході з мембранного модуля з корекцією по перепаду температур в середній точці каналу.*

14. Патент на корисну модель 122634. Спосіб автоматичного керування процесом мембранної дистиляції / **Р.М. Дубік**, Л.Р. Ладієва, Т.В. Ставитька; заявл. 17.05.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2, 2018 р. *Особистий внесок здобувача: запропоновано спосіб автоматичного керування процесом контактної мембранної дистиляції шляхом регулювання подачі теплоносія у нагрівач, в залежності від поточного значення коефіцієнта пропускної здатності мембрани.*

Тези доповідей у збірках матеріалів конференцій:

15. Ладієва Л.Р. Математична модель термомембранного розділення / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік** // 16 міжнародна конференція з автоматичного управління. Автоматика – 2009. Тези доповідей. Ченівці, 2009. С. 73 – 75. *Особистий внесок здобувача: розробка нелінійної моделі динаміки процесу контактної мембранної дистиляції.*

16. Ладієва Л.Р. Математическая модель процесса разделения неоднородных жидких систем / Л.Р. Ладієва, **Р.Н. Дубик**, А.Н. Прокофьев // XXII международная научная конференция. Математические методы в технике и технологиях ММТТ – 22. Сборник трудов. Том 4. Псков. Издательство ППИ, 2009. С. – 16 – 17. *Особистий внесок здобувача: отримання лінеаризованої моделі динаміки процесу контактної мембранної дистиляції для цілей керування.*

17. Ладієва Л.Р. Моделирование переносу в процесі мембранної дистиляції / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік** // Міжнародна науково-технічна конференція. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними комплексами. 26 – 27 вересня 2009, Київ. С. – 80 – 81. *Особистий внесок здобувача: розглянута задача переносу пари в перебігу процесу контактної мембранної дистиляції.*

18. **Дубік Р.М.** До питання оптимального керування процесом контактної мембранної дистиляції. 17 міжнародна конференція з автоматичного управління. Автоматика – 2010 / **Р.М. Дубік**, Л.Р. Ладієва // Тези доповідей. Харків, 2010. С. – 210 – 212. *Особистий внесок здобувача: розглянута можливість оптимального керування процесу контактної мембранної дистиляції.*

19. Ладієва Л.Р. Математична модель процесу контактної мембранної дистиляції / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік** // XXI Український науковий семінар «Мембранні і сорбційні процеси та технології». Тези доповідей. – Київ: НаУКМА, 10 – 11 березня

2011. С – 28. *Особистий внесок здобувача: запропонована математична модель процесу контактної мембранної дистиляції з розподіленими параметрами.*

20. **Дубік Р.М.** Керування процесом контактної мембранної дистиляції в умовах невизначеності / **Р.М. Дубік**, Л.Р. Ладієва // Автоматика/Automatics – 2011, 28 – 30 вересня 2011, Львів, Україна С. – 116 – 117. *Особистий внесок здобувача: запропоновано підхід до вирішення задачі керування процесу контактної мембранної дистиляції за допомогою H_∞ - регулятора.*

21. **Дубик Р.Н.** Система управления процессом контактной мембранной дистиляции в условиях неопределенности / **Р.Н. Дубик**, Л.Р. Ладиева // XXV международная научная конференция. «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-25. Том 1. 24 - 26 апреля, Саратов 2012. С. – 119 – 122. *Особистий внесок здобувача: розглянуті варіанти керування процесу контактної мембранної дистиляції, а саме H_∞ -регулятор, μ -регулятор та регулятор для нелінійної моделі.*

22. Ладієва Л.Р. Нелінійна система керування процесом контактної мембранної дистиляції в умовах невизначеності / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік** // Автоматика/Automatics – 2012, 26 – 28 вересня 2012, Київ, Україна С. – 113 – 114. *Особистий внесок здобувача: запропоновано вирішення задачі керування процесу контактної мембранної дистиляції за нелінійною моделлю.*

23. **Дубик Р.Н.** Система автоматизации процесса контактной мембранной дистиляции в условиях неопределенности / Р.М. Дубик, Л.Р. Ладиева // XXVI международная конференция «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-26. Том 1. Секция 1. 27 – 30 мая, Нижний Новгород 2013. С. – 62 – 64. *Особистий внесок здобувача: запропоновано гібридну систему керування процесу контактної мембранної дистиляції з μ -регулятором.*

24. Ладієва Л.Р. Керування процесом контактної мембранної дистиляції в умовах невизначеності за допомогою М – регулятора / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік** // Materialy IX mezinarodni vedecko-prakticka conference. VEDA A TECHNOLOGIE: KROK DO BUDOUCNOSTI – 2013, 27 unora 05 brezen 2013 roku. Dil 28 Technicke vedy. Praha Publishing House “Education and Science” s.r.o. 2013, pp. 75 – 79. *Особистий внесок здобувача: досліджено систему керування процесом контактної мембранної дистиляції з μ -регулятором.*

25. **Дубік Р.М.** Керування процесом контактної мембранної дистиляції за допомогою H_∞ - регулятора / **Р.М. Дубік**, Л.Р. Ладієва // Materialy IX miedzynarodowej naukowí-praktycznej konferencji. “NAUKOWA MYSL INFORMACYJNEJ POWIEKI - 2013” 07 – 15 marca 2013 roku. Volume 24 Techniczne nauki. Przemysl Nauka i Studia 2013. pp. 92 – 95. *Особистий внесок здобувача: досліджено систему керування процесом контактної мембранної дистиляції з H_∞ -регулятором.*

26. Ладієва Л.Р. Математична модель процесу мембранної дистиляції, що враховує температурну поляризацію / Л.Р. Ладієва, **Р.М. Дубік**, В.О. Оніщенко // Автоматика / Automatics – 2014, 23 – 27 вересня 2014, Київ. С – 282 – 283. *Особистий внесок здобувача: запропоновано критерій оптимальності для*

визначення початкового розподілу коефіцієнту поверхневої поруватості мембрани, який забезпечує необхідну рушійну силу процесу контактної мембранної дистиляції.

АНОТАЦІЯ

Дубік Р.М. Моделирование і робастне керування процесу контактної мембранної дистиляції. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ 2019.

Дисертація присвячена питанням підвищення ефективності керування установкою контактної мембранної дистиляції шляхом вдосконалення керування процесом при невизначеності функціональних властивостей мембрани. В результаті проведеного аналізу, встановлено, що для процесу контактної мембранної дистиляції характерні невизначеності такі як сумарний термічний опір та пористість, які суттєво впливають на керування процесом. Розроблена математична модель процесу, яка враховує просторовий розподіл швидкостей і температур за каналами мембранного модуля і в порах мембрани, а також спрощена модель для цілей керування, що враховує невизначеності параметрів процесу. Поставлена і розв’язана задача робастного керування процесом. Розроблена система керування процесом на основі робастного регулятора, що забезпечує керування процесом в умовах невизначеності і дозволяє при необхідності зупинити установку на очищення чи заміну мембрани.

Ключові слова: контактна мембранна дистиляція, математичне моделювання, робастне керування, система керування.

АННОТАЦИЯ

Дубик Р.Н. Моделирование и робастное управление процессом контактной мембранной дистиляцией. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев 2019.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности управления установкой контактной мембранной дистиляцией, путем усовершенствования управления процессом при наличии функциональных неопределенностей мембраны.

В результате проведенного анализа, установлено, что для процесса контактной мембранной дистилляции характерны неопределенности такие как суммарное термическое сопротивление и пористость, которые существенно влияют на управление процессом. Разработана математическая модель процесса, которая учитывает пространственное распределение скоростей и температур по каналам мембранного модуля и в порах мембраны, а также модель для целей управления, которая учитывает неопределенности параметров процесса. Поставлена и решена задача робастного управления процессом. Разработана система управления процессом на основе робастного регулятора, которая обеспечивает управления процессом в условиях неопределенности и позволяет при необходимости останавливать установку на очистку или замену мембраны.

Ключевые слова: контактная мембранная дистилляция, математическое моделирование, робастное управление, система управления.

SUMMARY

Dubik R.N. Modeling and robust control process of contact membrane distillation. – On the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.13.07 – Automation of control processes. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to the issues of improving efficiency management of the contact membrane distillation installation, which will help to increase the level of energy saving process with uncertainty of the membrane functional properties. The lack of fresh water has become a big problem of our time. According to the UN, more than a billion people on earth do not have access to clean fresh water. Traditional energy sources and freshwater reservoirs are rapidly becoming scarce. There was arise a strong need to develop less energy intensive and environmentally friendly water purification methods. Currently, reverse osmosis accounts for 60% of desalination plants around the world. An alternative to reverse osmosis is a contact membrane distillation. This process can be managed by using waste heat, including solar energy, geothermal energy and waste energy, which is due to the low temperature industrial flows. The membrane, which is used in the process of membrane distillation, provide the passage of only water vapor and thus, the obtained product is theoretically 100% pure from solid or non-volatile pollutants. The process is characterized by internal perturbations, in particular due to concentration polarization. During the solvent transfer through the membrane pores, the concentration of

the dissolved substance near its surface increases, which leads to a number of undesirable consequences. With time in operation - management of contact membrane distillation process became complicated due to changes in membrane characteristics. To ensure long-term operation of the system, it became necessary to build a process control system that will provide quality control in the event of significant uncertainties and uncontrolled internal disturbances, reducing control costs and simultaneously taking into account changes in membrane permeability for switching from normal operating conditions to the membrane cleaning mode.

Has been developed a mathematical model of the process that takes into account the spatial velocity distribution and temperatures along the channels of the membrane module and in the pores of the membrane and includes the equations of hydrodynamics and heat and mass transfer. For management purposes, has been developed a mathematical model of the dynamics contact membrane distillation process with lumped parameters. Proposed mathematical model of the contact membrane distillation process is non-linear with respect to the temperature of the solution.

The task was to develop a control system for the contact membrane distillation process, which should maintain stability and maintain a quality indicator within the acceptable limits with reduced management costs, provided that the membrane characteristics change during operation without the use of adaptation methods. Therefore, the problem of robust process control has been posed and solved. To solve the robust control problem, we applied H_∞ and μ optimization. Based on the analysis of the membrane state, during operation, it was believed that the total thermal resistance increases by +20%, and the porosity of the membrane decreases by 20%. The synthesis of the robust regulator consisted in the search for a stabilizing regulator, which would ensure that the process was conducted with sufficient quality, provided that the functional properties of the membrane deteriorated.

There are developed variants of automatic control systems of the contact membrane distillation process, the main difference of which, is in the method of measuring the temperature difference, which influence on capacity of the membrane. There is developed process control system on robusts regulator basis, which provides control of the process under conditions of uncertainty, and allows, if necessary, to stop the installation of membrane cleaning or replacing.

Key words: contact membrane distillation, mathematical modeling, robust control, system control.